

对表冷器热工计算中几个问题的探究

浙江理工大学 王 厉[☆] 马景辉

摘要 讨论了“进风等焓,出风也等焓”和“盘管表面平均状态点在空气初终状态点的连线上”这两个基本结论在热工计算中的应用,从热工计算方程组出发论证其实质,指出湿工况下盘管表面平均状态点只是近似成立。讨论了用盘管表面平均状态点判别工况的不足及其合理性,提出了一个干工况、湿工况和半干半湿工况的判别方法。最后结合算例加以分析验证。

关键词 表冷器 盘管表面平均状态点 工况判别

Several problems in thermodynamic calculation of surface air coolers

By Wang Li[★] and Ma Jinghui

Abstract Discusses the application of the two commonly used conclusions in the thermodynamic calculation of surface air coolers, i. e. “the same enthalpy of inlet air, the same enthalpy of outlet air” and “the mean coil surface state is on the line of the state points of the inlet and the outlet air”. Verifies them according to the thermodynamic calculating formulas. Points out that the mean coil surface state is approximatively existent under wet conditions. Discusses the shortcoming and rationality of the method of judging work conditions by mean coil surface state. Puts forward a method to judge work conditions of the fully dry, partially dry and fully wet. Analyses and demonstrates the method by a detailed calculation.

Keywords surface air cooler, mean coil surface state, work condition judging

★ Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, China

①

表冷器热工计算方法有很多,如干球温度效率法、湿球温度效率法、等价干工况法、水侧换热效率法和盘管表面平均温度计算法等等^[1-4]。这些计算方法过程各不相同,但具有的共同点是利用了“进风等焓,出风也等焓”或“盘管表面平均状态点在空气初终状态点的连线上”这些基本结论。为深刻认识这些基本结论,很有必要从表冷器的热湿交换过程出发进行逐一探讨。另外,表冷器的热工计算方法被人为分为干工况计算、半干半湿工况计算和湿工况计算三大类,在计算前必须进行工况判别,传统的方法利用盘管表面平均状态点温度进行工况判别,考虑到热湿传递过程的复杂性,这样的判别可能产生误差,如何进行有效的工况判别以及认识传统判别方法的合理性,本文对此进行探讨。

1 表冷器热工计算方程组

以常见的逆流换热表冷器为例,热空气与冷水

通过管道间壁进行换热,在稳态下,对这一过程通常可以作以下假设^[5]:1) 冷热流体质量流量及比热容在整个换热面上是常量;2) 管内外的表面传热系数在整个换热面上是常量;3) 换热器无热损失;4) 换热面沿流动方向的导热忽略不计;5) 当存在湿交换时,湿交换系数与管外表面传热系数之间符合路易斯关系式;6) 忽略盘管热阻,认为盘管温度一致;7) 管内外流体状态参数只沿换热面方向变化,即按一维换热考虑。根据以上假设可得表冷器换热微分方程组,如下(表冷器换热模型见图 1):

$$d\Phi = -q_{m1} dh_1 \quad (1)$$

①☆ 王厉,男,1976 年 3 月生,工学硕士,讲师
310018 杭州下沙高教园区浙江理工大学
(0571) 86843374

E-mail: deepstoh361@163.com

收稿日期:2006-07-25

修回日期:2006-10-09

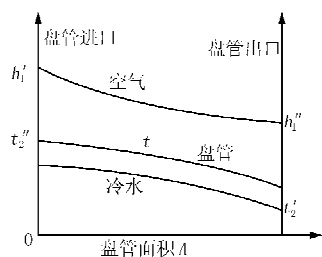


图1 表冷器换热模型

$$d\Phi = -q_{m2}c_2 dt_2 \quad (2)$$

$$d\Phi = dA \frac{\alpha_w}{c_1} (h_1 - h(t)) \quad (3)$$

$$d\Phi = dA \alpha_w (t_1 - t) \quad (3)'$$

$$d\Phi = \frac{dA}{\beta} \alpha_n (t - t_2) \quad (4)$$

$$-q_{m1} dD_1 = dA \frac{\alpha_w}{c_1} (D_1 - D(t)) \quad (5)$$

$$dD_1 = 0 \quad (D_1 < D(t)) \quad (5)'$$

式(1)~(5)'中 Φ 为传热量; q_{m1} , q_{m2} 分别为空气和水的质量流量; h_1 , h 分别为空气及盘管表面温度对应的比焓; t_1 , t , t_2 分别为空气、盘管表面及冷水温度; c_1 , c_2 分别为空气和水的比定压热容; A 为盘管外表面积; α_w 为干工况时的空气侧表面传热系数; α_n 为水侧表面传热系数; β 为肋化系数; D_1 , $D(t)$ 分别为空气及盘管表面温度对应的含湿量。

式(3)是在路易斯关系式基础上得到的,适用于表冷器湿工况。式(5)表示湿空气中水蒸气的湿平衡。由于表冷器不具有加湿功能,即在 $D_1 < D(t)$ 时,空气和盘管表面间不存在任何湿交换,此时盘管进入干工况,适用于式(3)'和(5)'。只有在干湿转换的临界点,式(3)'和式(3)才相同。

以校核计算为例,在盘管结构、空气和水进口参数已知的情况下,对于干工况进行计算。未知数有 $h_1(t_1)$, t , t_2 , Φ 共 4 个,可以通过式(1), (2), (3)', (4)积分求解;对于湿工况,未知数有 h_1 , D_1 , t , t_2 , Φ 共 5 个,可以通过式(1)~(5)积分求解。对方程组积分后,可以推导得到目前常用的热工计算方法,如干工况计算常用的对数温差法,湿工况计算常用的干球温度效率法等。

2 对“进风等焓,出风也等焓”的讨论

“进风等焓,出风也等焓”是表冷器热工计算中的常用结论。如图 2 所示,利用该结论把 $1'-1''$ 计算过程等价于计算 $a-b$ 过程,其中状态点 $1'$ 和 a 等比焓,求得 a 和 b 点后,可知 $1''$ 也在 b 的等比焓

线上, $a-b$ 连线交 100% 相对湿度线的状态点 e 即为盘管表面平均状态点,由该点向点 $1'$ 作直线与 b 点等比焓线的交点即为要求的出口空气状态点 $1''$, 这样的求解过程就是等价于工况计算法,该方法计算过程中不涉及表冷器析湿因数。同理,可将 $1'-1''$ 过程等价于计算 $c-d$ 过程,可计算得到 d 和 e 点,同样由 e 点向点 $1'$ 作直线与 d 点等比焓线的交点即为出口空气状态点 $1''$, 该过程要用到析湿因数,但在空调工程常用温度处理范围内, $c-d$ 过程析湿因数变化很小,甚至可近似视为常数,可简化计算过程,这样的求解方法就是湿球温度效率法。

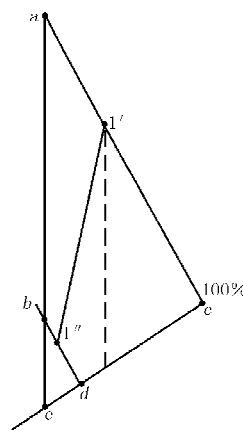


图2 等价工况

对于如图 2 所示的 $1'-1''$ 的空气处理过程,可用式(1)~(5)进行积分求解,得到以下方程(参考图 1):

$$\Phi = q_{m1} (h'_1 + h'_2) \quad (6)$$

$$\Phi = q_{m2} c_2 (t'_2 - t'_1) \quad (7)$$

$$\frac{h'_1 - \bar{h}(t)}{h'_1 - \bar{h}(t)} = e^{-\frac{\alpha_w A}{q_{m1} c_1}} \quad (8)$$

$$\frac{t'_2 - \bar{t}}{t'_2 - t} = e^{-\frac{\alpha_n A}{\beta q_{m2} c_2}} \quad (9)$$

$$\frac{D'_1 - \bar{D}(t)}{D'_1 - \bar{D}(t)} = e^{-\frac{\alpha_w A}{q_{m1} c_1}} \quad (10)$$

式(6)~(10)中 $\bar{t}$, $\bar{D}$, $\bar{h}$ 分别为盘管表面平均状态点的温度、含湿量和比焓(关于盘管表面平均状态点将在下面继续讨论)。以校核计算为例,在已知进口参数条件下,未知数为 h'_1 , t'_2 , D'_1 , Φ , $\bar{t}$, 可由以上 5 个公式唯一求解。可见,在进风量、进水量、进水温度等入口条件不变的情况下,只要假想进风比焓和实际进风比焓在同一等焓线上,由式(6)~(9)可知,

出风也必等焓,即所谓“进风等焓,出风也等焓”。

但在于工况下,根据式(1),(2),(3)',(4)不能得到相同的结论,因此“进风等焓,出风也等焓”只适合于湿工况,在于工况以及半干半湿工况中不成立,不能作为此时的计算依据。

3 关于盘管表面平均温度

在热工计算过程中,习惯用盘管表面平均状态

$$\int_A d\Phi = \int_A dA\alpha_w(t_1 - t) = \int_A dA\alpha_w t_1 - A\alpha_w \bar{t} \Rightarrow \bar{t} = \frac{\int_A t dA}{A} \quad (11)$$

同理,由水侧换热过程式(4)也可以得到相同的盘管表面平均温度计算公式。即在于工况下,由式(3)'和(4)确定的盘管表面平均温度相同,存在

$$\int_A dA \frac{\alpha_w}{c_1} (h_1 - h) = \int_A dA \frac{\alpha_w}{c_1} (h_1 - \bar{h}(\bar{t})) \Rightarrow \bar{h}(\bar{t}) = \frac{\int_A h(t) dA}{A} \quad (12)$$

如果盘管表面温度与其所对应比焓为线性关系,则盘管表面平均温度计算结果同式(11)。但实际上盘管表面的焓温关系为非线性关系,不能得到式(11)的结果,因此在湿工况过程中,严格上没有唯一的盘管表面平均温度,不宜用一个盘管表面平均温度代入积分方程进行热工计算。

但在一般空调工程温度范围内,100%相对湿度线上的焓温关系可近似地表示为

$$h = 0.07067t^2 + 0.6452t + 16.1694 \quad (13)$$

该公式误差一般不大于1%,对该公式进行线性拟合,结果见图3。可知,在一般情况下,虽然比

点来代表盘管表面的实际状态,该状态点的温度就是盘管表面平均温度,在该温度下,在整个换热面上,空气侧对盘管的换热量等于盘管对水侧的换热量。问题是是否确实存在这样一个唯一的盘管表面平均温度。

仍然从基本方程组出发,对于干工况而言,由空气侧换热过程式(3)',盘管表面平均温度 $\bar{t}$ 为

一个唯一的盘管表面平均温度。

对于湿工况,空气侧换热过程用式(3)表示,盘管表面平均温度 $\bar{t}$ 为

$$\int_A dA \frac{\alpha_w}{c_1} (h_1 - h) = \int_A dA \frac{\alpha_w}{c_1} (h_1 - \bar{h}(\bar{t})) \Rightarrow \bar{h}(\bar{t}) = \frac{\int_A h(t) dA}{A} \quad (12)$$

焓和温度之间是非线性的,但仍然存在较强的线性关系,因此从这个意义上看,湿工况计算中提出的盘管表面平均温度是可以近似成立的。

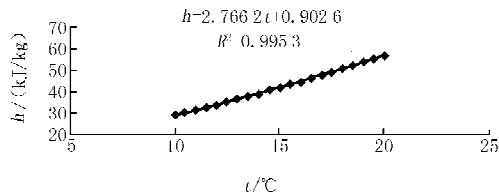


图3 盘管表面的焓温关系

同样,在湿工况下,受水蒸气平衡过程式(5)约束,盘管表面平均温度 $\bar{t}$ 应为

$$\int_A dA \frac{\alpha_w}{c_1} (D_1 - D(t)) = \frac{\alpha_w}{c_1} \int_A dA D_1 - \frac{\alpha_w}{c_1} \bar{D}(\bar{t}) A \Rightarrow \bar{D}(\bar{t}) = \frac{\int_A D(t) dA}{A} \quad (14)$$

盘管表面温度和其对应的饱和边界层的含湿量关系也是非线性关系,但在一般情况下,可近似地看为线性关系,如图4所示,于是式(14)的推导结果就可近似为式(11)。

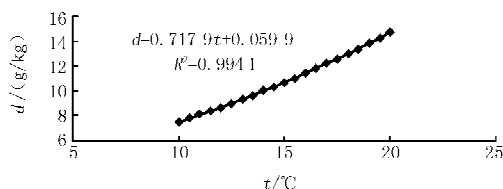


图4 盘管表面的湿温关系

4 对“盘管表面平均状态点在空气初终状态点的连线上”的讨论

如图2所示,在干球温度效率法、湿球温度效

率法和等价干工况法等热工计算中,这是一个必然被用到的结论,具有明显的几何意义,它给利用焓湿图进行表冷器热工计算带来了很大的方便。

对于湿工况,可由式(1),(3)积分得到式(8),由式(2),(4)积分得到式(10),比较式(8)和(10),即有下式成立:

$$\frac{D'_1 - \bar{D}(\bar{t})}{D'_1 - D''_1} = \frac{h'_1 - \bar{h}(\bar{t})}{h'_1 - h''_1} \quad (15)$$

该公式可变形为

$$\frac{h'_1 - h''_1}{D'_1 - D''_1} = \frac{h'_1 - \bar{h}(\bar{t})}{D'_1 - \bar{D}(\bar{t})} \quad (16)$$

如图2所示,由上式可知,1'-1''热湿比线与1'-e热湿比线相同,说明这3点在同一直线上,即所谓“盘管表面平均状态点在空气初终状态点的连

线上”。当利用该结论时,可以代替式(10)进行表冷器热工计算。

但对于干工况,很明显不能得到这一结论,除非是在干湿转换的临界工况点上。

5 关于干湿工况判别

5.1 用盘管表面平均温度判别工况存在的不足及其合理性

通常应用的表冷器热工计算方法分为干工况计算和湿工况计算两类。这两种计算方法有截然不同的计算假设,即前者认为空气状态始终沿等含湿线变化,后者认为空气的终状态点始终在盘管平均状态点和空气初始状态点的连线上。为了正确应用这两种方法,在进行计算时,首先要判别工况。通常的工况判别方法是用盘管平均状态点的温度来判别,即不管采用哪种计算方法,若计算出的盘管平均温度小于空气初始状态点露点温度,则认为应采用湿工况计算方法,反之则采用干工况计算方法,当等于该露点温度时,则认为该处理过程为临界工况。

采用这样的判别方法并不十分准确,因为盘管平均温度是由式(11)计算得到的,它比进口盘管温度低(取空气进口处为表冷器盘管进口),但又比出口盘管温度高(取空气出口处为表冷器盘管出口),而空气处理过程中,是否存在湿工况实际上是由当地盘管温度和当地空气露点温度的比较来决定的。

如图 5 所示, t' , $\bar{t}$, t'' 分别表示盘管的进口、平均和出口温度。按盘管表面平均温度判别,该温度 $\bar{t}$ 大于空气初始状态露点温度,因此判别为干工况,但实际上此时的盘管出口温度 t'' 是小于出口空气 $1''$ 的露点温度的,因此至少在盘管出口处不为干工况,说明采用盘管表面平均温度判别不合理。

由于表冷器处理空气过程中,最容易在空气进口处发生干工况,而最容易在空气出口处发生湿工况,因此可用相应的盘管进出口表面温度这两个关键点来判别工况。如图 6 所示,盘管出口温度 t'' 高于空气进口露点温度,此时为干工况。如图 7 所示,盘管进口温度小于进口空气露点温度,此时为湿工况。如图 8 所示,此时的工况既不同于干工况(见图 6),又不同湿工况(见图 7),因此必然是一个半干半湿工况。

图 8 是用盘管表面平均温度法判别时的临界工况,在这个工况下,用于干工况计算和用湿工况计

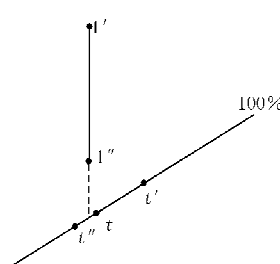


图 5 工况判别示意图

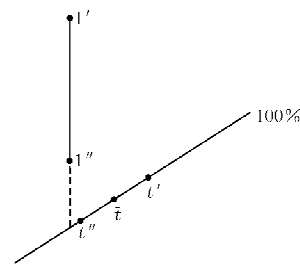


图 6 干工况判别示意图

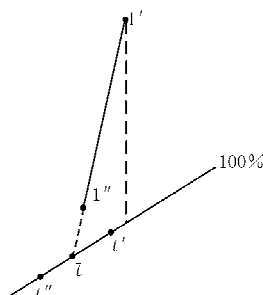


图 7 湿工况判别示意图

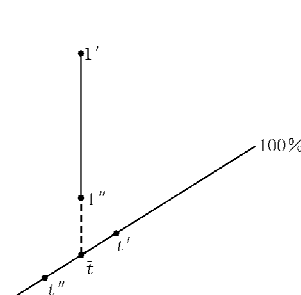


图 8 半干半湿工况的临界工况

算结果相同,盘管表面平均温度法将其作为干湿工况的临界点,实际上是把一部分半干半湿工况视为干工况,把另一部分半干半湿工况视为湿工况,它不能把半干半湿工况区从整个工况中单独区分出来。但利用盘管表面平均温度法能否准确地判定干工况和湿工况呢?对这个问题分成以下四种情况讨论:

1) 实际过程为干工况,进行了干工况计算。见图 6,必然有盘管出口温度 t'' 大于进口空气的露点温度,而盘管表面平均温度 $\bar{t}$ 又必然大于 t'' ,因此盘管表面平均温度是大于进口空气的露点温度的,盘管表面平均温度判别法则合理。

2) 实际过程为湿工况,进行了湿工况计算。见图 7,必然有盘管进口温度 t' 小于进口空气的露点温度,而盘管表面平均温度 $\bar{t}$ 又必然小于 t' ,因此盘管表面平均温度是肯定小于进口空气的露点温度的,盘管表面平均温度判别法则合理。

3) 实际过程为湿工况,但进行了干工况计算。见图 8,由前所述,图 8 表明工况在半干半湿工况阶段,此时盘管表面平均温度等于进口空气露点温度,当过程过渡到实际的湿工况时(如进水温度进一步降低),盘管表面平均温度将必然小于进口空气露点温度,因此在这种情况下利用盘管表面平均温度判别法可以正确判别出湿工

况。

4) 实际过程为干工况,但进行了湿工况计算。见图 8,图 8 表明工况处于半干半湿阶段,此时盘管表面平均温度等于进口空气露点温度,当过程过渡到实际的干工况时(如进水温度进一步提高),盘管表面平均温度将必然大于进口空气露点温度,因此在这种情况下利用盘管表面平均温度判别法也可以正确判别出干工况。

由上面的讨论可知,不论采用干工况计算还是湿工况计算,使用盘管表面平均温度判别法都能够准确判别出真正的湿工况和干工况,但由于不能判别半干半湿工况,因此在某些情况下可能将半干半湿工况判别为干工况,也可能将其判别为湿工况,从而在热工计算上产生一定误差。

5.2 用盘管表面温度判别干、湿和半干半湿工况

针对盘管表面平均温度法判别工况的不合理性,本文提出在盘管进出口处这两个关键点,用盘管表面温度来判别表冷器工况,整个表冷器的工况判别和热工计算过程见图 9(以校核计算为例)。

其中干工况判别时的盘管出口温度由式(3)'和式(4)可解得:

$$dA \alpha_w (t_1 - t) = \frac{dA}{\beta} \alpha_n (t - t_2) \Rightarrow t = \frac{t_1 + \frac{\alpha_n t_2}{\alpha_w \beta}}{1 + \frac{\alpha_n}{\alpha_w \beta}} \quad (17)$$

则在出口处得到盘管出口温度 t'' 为

$$t' = \frac{\alpha_n c_1}{0.141 \ 34 \alpha_w \beta} \left[- \left(1 + \frac{0.645 \ 2 \alpha_w \beta}{\alpha_n c_1} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{0.645 \ 2 \alpha_w \beta}{\alpha_n c_1} \right)^2 - \frac{0.282 \ 68 \alpha_w \beta}{\alpha_n c_1} (\alpha_w \beta \frac{16.169 \ 4 - h'_1}{\alpha_n c_1} - t'_2)} \right] \quad (19)$$

式中 h'_1, t'_2 分别为进口空气的比焓和冷水出口温度。

用该方法可以准确区分出干工况、湿工况和半干半湿工况,从而为下一步采用相应的表冷器热工计算方法做好准备。

6 计算示例

已知被处理空气干球温度为 25 °C, 含湿量为 9 g/kg, 空气流量为 25 000 m³/h, 进水温度为 8.5 °C, 水流量为 6.02 kg/s, 表冷器结构参照文献[1]选择 JW30 系列。换热面积 100 m², 迎面风速 2.7 m/s, 水流速 1.09 m/s。按本文提出的方法进行工况判别和热工计算。计算程序按式

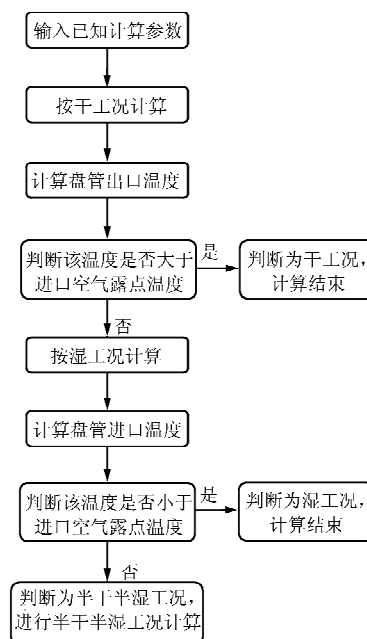


图 9 表冷器工况判别及热工计算流程

$$t'' = \frac{t'_1 + \frac{\alpha_n t'_2}{\alpha_w \beta}}{1 + \frac{\alpha_n}{\alpha_w \beta}} \quad (18)$$

式中 t'_1, t'_2 分别为空气出口温度和冷水进口温度。

湿工况判别时的盘管进口温度可由式(3)和式(4)表示为: $dA \frac{\alpha_w}{c_1} (h_1 - h(t)) = \frac{dA}{\beta} \alpha_n (t - t_2)$, 再结合式(13), 将关于盘管温度 t 的计算公式化为显式, 解得盘管进口温度 t' 为

(1)~(5)的积分方程编制, 其中半干半湿工况按干表面部分和湿表面部分进行计算, 结合点是干湿转换的临界点, 此时盘管表面温度等于进口空气露点温度。

干工况计算结果见表 1。由于此时盘管出口温度小于进口空气露点温度, 因此确定不是干工况。下面再进行湿工况计算, 以确定是湿工况还是半干半湿工况。

表 1 干工况计算结果

换热量/ kW	出口水温/ °C	出口空气 温度/°C	盘管平均 温度/°C	进口空气露 点温度/°C	盘管出口 温度/°C
55.297 2	10.688 6	15.527 7	11.395 2	12.541 6	9.647 7

湿工况计算结果见表 2。由于盘管进口温度比进口空气露点温度高,因此也不可能是湿工况,最后确定该工况为半干半湿工况。再进行半干半湿工况计算。

表 2 湿工况计算结果

换热量/ kW	出水 温/℃	出口空气 温度/℃	出口空气含湿 量/(g/kg)	盘管平均 温度/℃	进口空气露 点温度/℃	盘管进口 温度/℃
60.006 7	10.873 1	15.813 6	8.623 8	11.639 2	12.541 6	13.086 0

半干半湿工况计算结果见表 3。半干半湿工

表 3 半干半湿工况计算结果

换热量/kW	出水温度/℃	出口空气温度/℃	出口空气含湿 量/(g/kg)	进口空气露点 温度/℃	盘管进口温度/℃	盘管出口温度/℃
61.453 8	10.931 9	15.727 4	8.547 8	12.541 6	13.229 5	10.007 2
干表面换 热量/kW	湿表面换 热量/kW	干/湿表面平 均换热温度/℃	干表面 面积/m ²	湿表面 面积/m ²	临界点空 气温度/℃	临界点 水温/℃
14.558 2	85.441 7	12.887 4/11.347 4	14.558 2	85.441 7	23.071 0	10.486 2

趋向于干工况时,两者差别会进一步增大。如其他条件不变,增大供水温度到 9.9℃(此时正好处于图 8 临界工况),按湿工况计算换热量为 51.13 kW,按半干半湿工况计算换热量为 55.07 kW,两者相差 7.2%。按供水温度区分的干工况、半干半湿工况和湿工况见图 10。盘管表面平均温度法把供水温度为 7.5~9.9℃时的半干半湿工况视为湿工况,把 9.9~11.6℃的半干半湿工况视为干工况,计算误差也将由此产生。

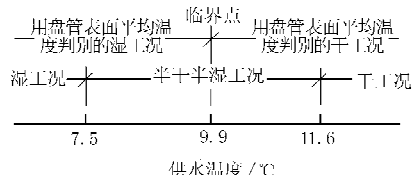


图 10 工况分区图

7 结论

7.1 对“进风等焓,出风也等焓”,“盘管表面平均状态点在空气初终状态点的连线上”这两个结论,从表冷器热工计算基本方程组出发,进行了详细论证,探讨了它们在热工计算中的作用,并指出它们只在湿工况中成立,并不适合干工况或半干半湿工况。

况计算结果与按干工况计算和按湿工况计算都略有不同,进口空气露点温度在盘管进出口温度之间,符合半干半湿工况的特点,干表面只占总表面的 12.9%,湿表面占 87.1%,因此该工况更趋向湿工况。

如果按盘管表面平均温度法判别,结果将被判为湿工况,按湿工况计算后的换热量与按半干半湿工况计算相差 2.3%,见表 2 和表 3。当计算条件

7.2 分析得到盘管表面平均温度在湿工况计算中只是近似存在的结论。

7.3 当使用盘管表面平均温度进行工况判别时,不论是采用干工况还是湿工况计算,得到的盘管表面平均温度都可以用来准确判别干工况和湿工况,但不能判别半干半湿工况。

7.4 提出了能够准确判别干工况、湿工况和半干半湿工况的方法。并对一个实例进行了工况判别和热工计算。同时比较了两种工况判别的差异,计算显示,将半干半湿工况当成干工况或湿工况计算时,其误差将随与半干半湿工况的偏离程度的增加而增加。

参考文献:

- [1] 清华大学,西安冶金建筑学院,同济大学,等. 空气调节[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,1985
- [2] 王晋生. 水冷式表冷器传热研究(1):用干湿转换法计算湿工况[J]. 暖通空调,2000,30(4)
- [3] 乐有奋,王清平. 表冷器热工计算新方法[J]. 暖通空调,2005,35(7)
- [4] 王晋生. 水冷式表冷器传热研究(5):用盘管表面平均温度法计算表冷器湿工况[J]. 暖通空调,2001,31(5)
- [5] 杨世铭. 传热学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,1998

· 书讯 ·

《建筑设备自动化》

由江亿院士历经 8 年时间所著的《建筑设备自动化》教材于近期出版了。该书结合实际工程系统地介绍了建筑设备自动化系统。通过对四个工程问题的分析,从浅入深逐步介绍了控制系统的基本概念,控制原理的初步知识以及通断控制、PID 控制等控制调节方法,建筑热湿环境的控制问题,并从整体设计出发全面介绍了建筑自动化系统的通信技术、设计过程、分析方法和关键问题。

在该书提供的网络下载中有建立在 simulink 仿真软

件上的各章所讨论的控制系统模型。读者可利用这些模型验证该书所讨论的内容,并可编辑相关模型以解决实际工程中类似的问题。

该书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材,由江亿、姜子炎著,中国建筑工业出版社出版,全书约 33 万字,定价 26 元。

(齐庆梅)